

СПЕКТРОМЕТР С МОДУЛЯЦИЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ НА БАЗЕ ДИОДНОГО ЛАЗЕРА С ИНЖЕКЦИОННЫМ ЗАХВАТОМ

© 2010 Е.А. Чернышова

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Поступила в редакцию 11 01 2010

В работе с помощью модельных расчетов показан характер искажений вносимых остаточной амплитудной модуляцией зондирующего оптического излучения в сигнал диодно-лазерного спектрометра с модуляцией длины волны. Демонстрируется возможность создания ЧМ-модулированного лазерного источника, с подавленной остаточной АМ, для улучшения характеристик излучения спектрометра. Ключевые слова: диодные лазеры, спектроскопия с модуляцией длины волны, подавление остаточной амплитудной модуляции, оптический инжекционный захват лазера.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов, ограничивающих чувствительность спектроскопии с модуляцией длины волны (WMS-спектроскопии), является остаточная амплитудная модуляция (РАМ) зондирующего лазерного излучения [1]. Кроме ухудшения чувствительности при WMS, остаточная амплитудная модуляция вызывает искажение формы и сдвиг центра линии поглощения, что затрудняет интерпретацию спектроскопической информации. Балансное фотодетектирование оптического излучения позволяет уменьшить влияние остаточной АМ на сигнал WMS-спектрометра. Однако балансный фотодетектор, полностью устраняющий РАМ, реализовать технически сложно. Предполагается, что улучшению WMS-измерений будет способствовать использование ЧМ модулированных лазерных источников с подавленной остаточной вариацией интенсивности. Цель данной работы заключалась в уточнении характера искажений вносимых остаточной амплитудной модуляцией и изучении возможности подавления РАМ при инжекции АМ-ЧМ модулированного излучения в диодный лазер-усилитель.

2. ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА СИГНАЛ СПЕКТРОМЕТРА С МОДУЛЯЦИЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

Рассмотрим WMS-спектрометр, в котором диодный лазер (ДЛ) является источником зондирующего оптического излучения (рис. 1а). Привлекательность использования ДЛ объясняется простотой осуществления ЧМ-модуляции

(через изменение тока накачки $I_{дл}$), что позволяет отказаться от внешних оптических модуляторов. Однако изменение тока $I_{дл}$, неизбежно приводит к возникновению, дополнительно к ЧМ, паразитной РАМ, поскольку выходная оптическая мощность ДЛ линейно зависит от тока накачки. Следует отметить, что остаточная АМ возникает, в той или иной степени, и при использовании внешних ЧМ-модуляторов оптического излучения. В связи с этим важно четко представлять характер искажений вносимых РАМ в детектируемый WMS-сигнал.

Моделирование формы выходного сигнала диодно-лазерного WMS-спектрометра выполнялось в приближении слабого резонансного поглощения в газе на частоте ν_a . Рассматривались случаи чистой ЧМ и комбинированной АМ-ЧМ для индекса модуляции m в интервале от 0.1 до 15. При анализе чистой ЧМ использовался подход [2], согласно которому, оптическая интенсивность на выходе из ячейки с газом (рис. 1а), раскладывалась в ряд Фурье по гармоническим функциям. Как показано в [2], для Лоренцевской линии поглощения коэффициенты разложения в ряд (амплитуды гармоник выходного электрического сигнала) могут быть рассчитаны аналитически с помощью выражения:

$$H_n(x, m) = I_0 \left(J_n(0) - \frac{a_0}{2} \left((-i)^n e^n K(x) + c.c \right) \right), \quad (1)$$

где $K(x)$ – функция, имеющий следующий вид:

$$K(x) = \frac{\left[\sqrt{(1-ix)^2 + m^2} - (1-ix) \right]^n}{m^n \sqrt{(1-ix)^2 + m^2}}, \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность излучения на входе в ячейку с исследуемым газом, $J_n(0)$ – функция Бесселя n -го порядка, a_0 – поглощение в центре линии, m –

Чернышова Екатерина Александровна, инженер.
E-mail: chak@fian.smr.ru

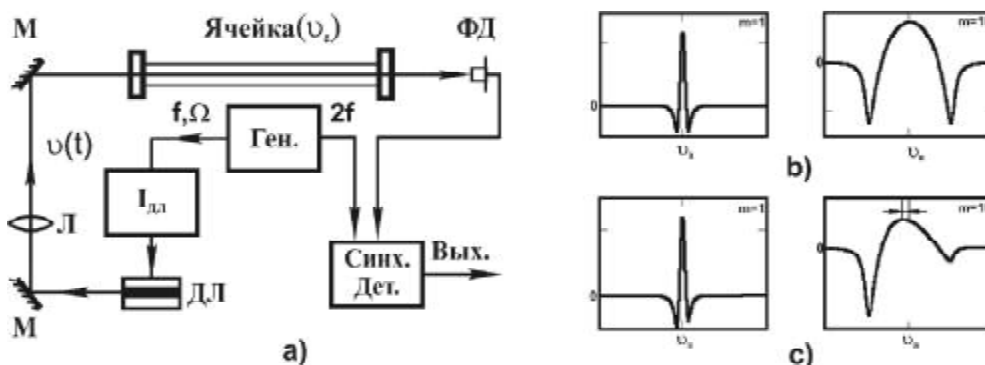


Рис. 1. WMS-спектрометр:

а – оптическая схема; б – профиль сигнала 2-ой гармоники при чистой ЧМ-модуляции; в – профиль сигнала 2-ой гармоники при комбинированной АМ-ЧМ модуляции.
 Ген. – генератор частот; $I_{дл}$ – источник тока накачки; ДЛ – диодный лазер; Л – линза; М – зеркало; ФД – фотодетектор; Синх.Дет. – синхронный детектор

индекс модуляции, с.с. представляет собой выражение комплексно сопряженное предыдущему слагаемому. Используя выражение (1) был рассчитан сигнал второй гармоники (2f), обычно регистрируемой экспериментально. Результаты представлены на рис. 1b для случаев малого ($m=1$) и большого ($m=10$) индексов модуляции. Из рисунка видно, что регистрируемый сигнал симметричен относительно центра (v_a) линии поглощения исследуемого газа. Увеличение индекса модуляции m , необходимое при регистрации слабого поглощения, приводит лишь к уширению контура сигнала второй гармоники. Рассчитанные WMS-сигналы на рис. 1b, соответствующие чистой ЧМ, в дальнейшем использовались как эталонные для уточнения характера искажений вносимых RAM.

При комбинированной модуляции, наличие остаточной АМ учитывается введением линейной зависимости лазерной мощности от частоты модуляции [1]. В этом случае, для Лоренцевской линии поглощения, интенсивность на выходе газовой ячейки, будет описываться более сложным аналитическим выражением, чем при чистой ЧМ. Затем, как и ранее интенсивность на выходе из ячейки раскладывается в гармонический ряд, и проводятся вычисления коэффициентов разложения. Общие выражения для коэффициентов разложения (амплитуд гармоник) довольно громоздки и поэтому здесь ограничимся результатом для 2-ой гармоники:

$$\begin{aligned}
 H_{2p}(x, m) &= I_{\Omega}(x) \cos(2\psi) H_2(x, m) - p_{\omega} \gamma \frac{m}{2} \times \\
 &\times [\cos(\psi) H_1(x, m) + \cos(3\psi) H_3(x, m)]; \\
 H_{2q}(x, m) &= I_{\Omega}(x) \sin(2\psi) H_2(x, m) - p_{\omega} \gamma \frac{m}{2} \times \\
 &\times [\sin(\psi) H_1(x, m) + \sin(3\psi) H_3(x, m)]. \quad (3a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{2,\Phi}(x, m) &= I_0 [H_{2p}(x, m) \cos(\Phi_2) + \\
 &+ H_{2q}(x, m) \sin(\Phi_2)]. \quad (3b)
 \end{aligned}$$

Как следует из [2], при комбинированной модуляции даже с небольшим индексом ($m < 1$) в амплитуду сигнала на n -ой гармонике также дают вклады $n+1$ и $n-1$ гармоник. Результаты расчетов по формулам (3a, b) для случая комбинированной модуляции представлены на рис. 1c. Видно, что выходной WMS-сигнал при ЧМ-АМ модуляции больше не является симметричным относительно центра (v_a) линии поглощения. Дополнительно, при больших индексах m наблюдается уширение контура и сдвиг максимума сигнала.

3. ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК С ПОДАВЛЕННОЙ ОСТАТОЧНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В качестве ЧМ-модулированного источника излучения с подавленной RAM предлагается использовать систему из двух ДЛ: задающего и ведомого рис. 2a. Излучение задающего лазера ДЛ1 модулируется по частоте, через изменение тока накачки, и инжектируется в ведомый лазер ДЛ2. Рассматривалась V-образная схема инжекции оптического сигнала в ДЛ2, которая обеспечивает пространственное разделение входного и выходного пучков и позволяет получить более мощное выходное излучение. Ведомый лазер работает в режиме насыщения оптического усиления. Следовательно, при инжекции в ДЛ2 оптического АМ-ЧМ излучения его выходная мощность будет оставаться практически постоянной, в то время как, частота лазерного излучения будет меняться в соответствии с модуляцией.

Подавление RAM в системе из двух связанных диодных лазеров можно продемонстрировать на графике зависимости выходной мощности P_{out} ведомого лазера от инжектируемой в него мощности P_{inj} . Компьютерная модель, позволяющая рассчитать указанную зависимость, построена на основе методики изложенной в работе [3]. При расчете распространения оптического излучения внутри ведомого лазера, его активная область (размером 100×750 мкм), была разделена на сегменты рис. 2b. Входное инжектируемое излучение P_{inj} , моделировалось как набор пучков P_{OSC}^i , падающих под одинаковыми углами на лазерную грань с $R1=0$ ведомого ДЛ2. Количество входящих пучков совпадает с числом боковых сегментов, расположенных в верхней половине активной области ведомого лазера. Распространение излучения внутри рассматривается в прямом (от грани с $R1=0$ до грани с $R2=0.95$) и обратном направлении. Распространение входных пучков (P_{OSC}^i) в прямом направлении активной области происходит следующим образом: излучение проходит три сегмента в продольном направлении ($3dz$), затем смещается на один сегмент в поперечном направлении (dx). Проходя, таким образом, расстояние до лазерной грани с $R2=0.95$, P_{OSC}^i отражается от нее и начинает распространяться в обратном направлении, согласно ранее описанной траектории. Собственное спонтанное излучение ведомого лазе-

ра (P_{ASE}^i) представлялось как набор прямолинейно распространяющихся лучей, число которых совпадает с числом боковых сегментов активной области. Полная мощность в отдельном сегменте $P_{m,n}^{\Sigma}$ складывается из усиленного инжектируемого излучения лазера ДЛ1 и усиленного собственного спонтанного излучения ведомого лазера. Оптическое усиление в каждом сегменте происходит на одну и ту же величину. Изменение мощности в конкретном элементе может быть вычислено как:

$$dP_{m,n}^{OSC} = P_{m-1,n-1}^{OSC} \cdot g \cdot e^{-\frac{P_{m-1,n-1}^{\Sigma}}{\gamma(I)}} dz, \quad (4a)$$

$$dP_{m,n}^{ASE} = P_{m-1,n-1}^{ASE} \cdot g \cdot e^{-\frac{P_{m-1,n-1}^{\Sigma}}{\gamma(I)}} dz + a_{sp} N_{max}^2 \quad (4b)$$

g – усиление, которое может быть представлено как:

$$g = b(N_{max}(I) - N_t), \quad (5)$$

где $dP_{m,n}^x$ – изменение полной мощности в конкретном сегменте, b – коэффициент усиления, учитывающий материальные свойства активной среды, $P_{m-1,n-1}^{\Sigma}$ – значение полной мощности, входящей в n -ый сегмент из $(n-1)$ -го, $N_{max}(I)$ – плотность носителей в отсутствии света, N_t –

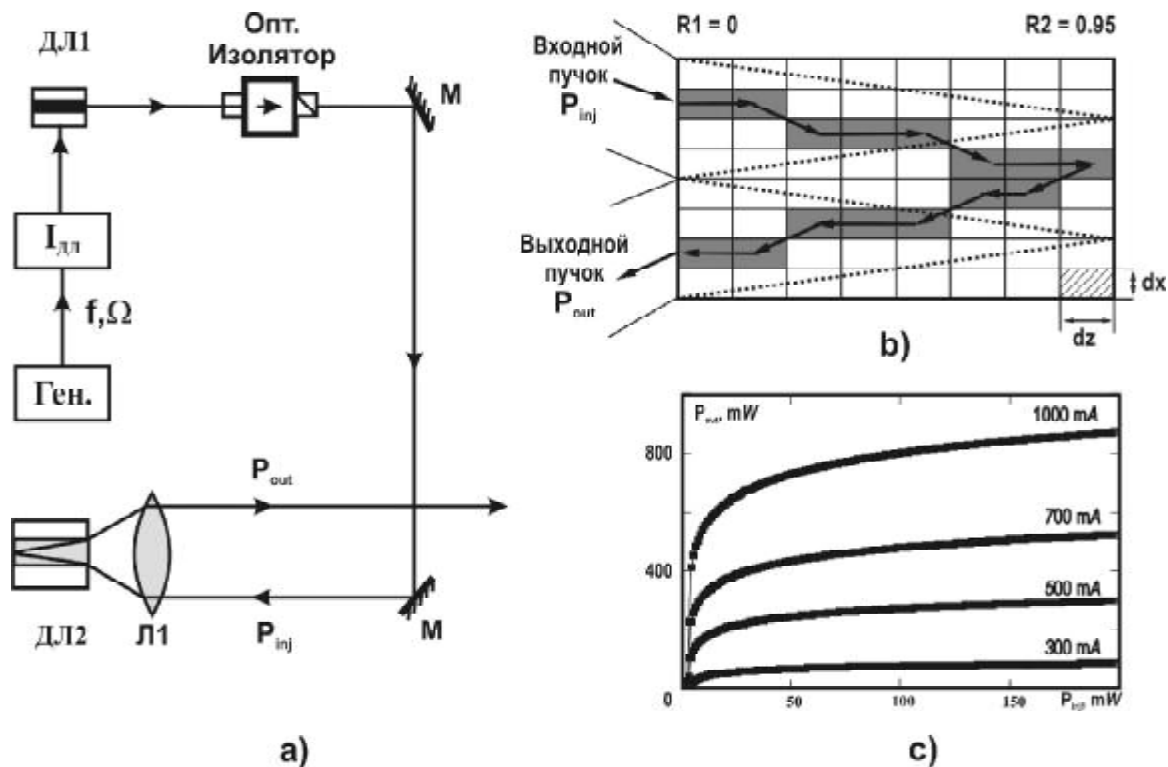


Рис. 2. Лазер с инжекцией внешнего оптического излучения:

а – схема эксперимента; б – модельная схема распространения света в активной области лазера ДЛ2; в – расчетная зависимость выходной мощности ДЛ2 P_{out} от инжектируемой мощности P_{inj} .

плотность носителей в случае прозрачности среды, $\gamma(I)$ – мощность насыщения. Задавая значение инжектируемой оптической мощности P_{inj} , определяем величины мощностей $P_{m,1}^{OSC}$, входящих в первые боковые сегменты, расположенные в верхней половине активной области. Используя формулы (4а, б) и устанавливая конкретное значение тока накачки, производились модельные расчеты выходной мощности излучения ведомого лазера P_{out} (значения полной мощности $P_{m,n}^{OSC} + P_{m,n}^{ASE}$ в боковых сегментах, расположенных в нижней половине активной области).

Результирующий расчетный график зависимости выходной мощности P_{out} от инжектируемой мощности P_{inj} для различных значений токов накачки ДЛ2 показан на рис. 2с. График имеет участок почти параллельный горизонтальной оси, соответствующий насыщению оптического усиления. На данном участке, мощность выходного излучения ведомого ДЛ остается практически постоянной, несмотря на изменение P_{inj} , что указывает на подавление РАМ. Полученный график, позволяет выбрать рабочую точку так, чтобы величина остаточной АМ в излучении ведомого лазера была минимальной.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных расчетов установлено, что остаточная амплитудная модуляция

вызывает сдвиг максимума WMS-сигнала относительно центра линии поглощения и вносит асимметрию в его форму. Также, при больших индексах модуляции, РАМ приводит к дополнительному уширению регистрируемого сигнала. Проведенные модельные расчеты для системы двух диодных лазеров в режиме инжекционного захвата качественно подтверждают, что при модуляции задающего лазера через ток накачки, на выходе ведомого лазера будет присутствовать ЧМ-модулированное излучение с подавленной остаточной АМ.

В заключение автор выражает благодарность к.ф.-м.н. Котовой С.П. и к.ф.-м.н. Чернышовой А.К. за помощь в проведении расчетов и подробное обсуждение результатов. Работа поддержана УНК ФИАН и Целевой Программой Президиума РАН поддержки молодых ученых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rosa M. de, Ciucci A.* [et al]. On the measurement of pressure induced shift by diode lasers and harmonic detection // Opt.Communication. 1998. № 147. P. 55-60.
2. *Schilt S., Thevenaz L., Robert Ph.* Wavelength modulation spectroscopy: combined frequency and intensity laser modulation. // J. Appl. Optics. 2003. V.42(33). P. 6728-6738.
3. *Gehrig E., Beier B., Boller K.-J., Wallenstein R.* Experimental characterization and numerical modelling of an AlGaAs oscillator broad area pass amplifier system // Appl. Physics B. 1998. № 66. P. 287-293.

WAVELENGTH MODULATION SPECTROMETER ON THE BASIS OF DIODE LASER WITH INJECTION LOCKING

© 2010 E.A. Chernyshova

Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

Obvious view of signal distortion of wavelength modulation diode-laser spectrometer is demonstrated by means of computer calculations. It is considered the opportunity of creation of the FM-modulated laser source with suppression of residual AM for improvement of radiation spectrometer characteristics.

Key words: diode lasers, wavelength modulation spectroscopy, suppression of residual amplitude modulation (RAM), injection locking laser system.